超级营养：开启智慧食品和自然健康的金钥匙*

方正锋

（农业农村部农产品加工与营养健康重点实验室 四川农业大学食品学院 雅安 625014）

摘要：

[目的]分析并构建以超级营养理论为指导、智慧食品为抓手、人工智能（AI）为手段、精准营养为路径的营养健康研究新范式。

[方法]通过文献查阅，在分析应用传统营养理论指导现代营养健康实践方面的局限性的基础上，提出了超级营养理论，论述了超级营养理论的核心要义，并提出营养健康的建设路径。

[结果] 超级营养理论是以科学性为内涵，普适性、前瞻性、愉悦性和合理性为外延的营养理论，是研发以安全、优质、亲民、必需和可口为特征的智慧食品的理论先导。

[局限] 现代食品营养与健康数据体系的构建涉及食品、医学、AI 等多学科交叉，超级营养理论的实践需要多部门、跨学科和跨领域的合作。

[结论] 超级营养理论首次提出了基于数字化表征的营养一至四级结构，为引入现代 AI 技术实现精准营养和智能健康管理提供了实施路径。

关键词：营养　食品　健康　数字化表征　人工智能

分类号：TP393

Super nutrition: the golden key to unlocking smart food and natural health

Zhengfeng Fang

(Key Laboratory of Agricultural Product Processing and Nutrition Health, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, College of Food Science, Sichuan Agricultural University, Yaan 625014, China)

Abstract:

[Objective] Address and construct a new paradigm for nutrition and health research guided by the theory of super nutrition, with smart food as the carrier, artificial intelligence (AI) as the means, and precise nutrition as the target.

[Methods] Based on literature review and analysis of the limitations of using traditional nutrition theory to guide modern nutrition and health practices, the super nutrition theory is proposed. The core essence of super nutrition is disssected, and the implementation path of nutrition and health is proposed.

[Results] Super nutrition is a nutrition theory that takes scientificalness as its connotation and universality, perspectiveness, enjoyability, and reasonability as its extension. Super nutrition is the theoretical basis for producing smart foods characterized by safety, merit, affordability, requirement, and tasty.

---

* 本文系中华人民共和国教育部“长江学者奖励计划”（项目编号：T2020155）的研究成果之一。

[Limitations] The construction of a food nutrition and health data system involves interdisciplinary collaboration in food, medicine, AI, and other fields. The practice of super nutrition theory requires collaboration across multiple departments, disciplines, and fields.

[Conclusions] The super nutrition theory first proposed the primary,secondary,tertiary,and quaternary structures of nutrition based on digital characterization, paving a way for introducing modern AI technology to achieve precise nutrition and intelligent health management.

Keywords： Nutrition Food Health Digital characterization Artificial intelligence

1 超级营养的提出背景

随着社会经济的发展，饮食对营养健康的影响受到了国际社会越来越多的关注。《Lancet》2019 年的一项研究[1]对上世纪 90 年代以来（1990-2017 年）全球 195 个国家饮食风险对健康的影响进行系统分析发现，2017 年的 1100 万例死亡和 2.55 亿例残疾调整生命年可归因于高钠、高反式脂肪、低全谷物、低坚果、低 ω-3 脂肪酸等饮食风险因素。该研究指出，次优饮食导致的全球死亡人数比包括吸烟在内的其他任何风险都高[2,3]，突显了世界各国改善饮食的迫切需要[1]。经一系列人群层面的饮食干预措施有效性的系统评估表明，大众媒体宣传、食品定价策略（补贴和税收）、食品和菜单标签、工作场所健康计划和学校采购政策是有前景的饮食干预措施[1]。对这些措施的成本效益分析表明，针对钠等特定饮食因素进行干预不仅具有健康效益，而且可以节省成本。然而，通过人群层面的干预措施改善饮食面临着几个重大挑战[1]：其一，几乎没有证据表明这些措施对全谷物、坚果和海鲜等几个重要饮食因素的有效性；其二，大多数措施的效果远低于实现最佳饮食所需的水平；其三，尽管公众和政治意愿日益增强，但很少有国家成功通过并实施了反式脂肪禁令等政策；其四，饮食干预的成本效益分析通常基于一系列简化假设，不考虑消费者（如替代效应）、食品行业（如食品配方和定价策略）和其他利益相关者的反应；其五，这些政策中的许多政策只针对消费者，而没有考虑整个食品系统中存在的广泛相互关联的因素，如食品生产、加工和分销。事实上，这些因素也能影响饮食消费，将其纳入改善饮食具有重要意义[1]。因此，鉴于饮食造成的疾病负担的严重性和现有干预措施的局限性，迫切需要开发新的食品系统干预措施。现有干预措施效果欠佳的深层次原因是什么？开发新的干预措施的着力点在哪里？这两个问题亟待深思和探讨。众所周知，意识决定行动，由于食品系统涉及生产者、消费者、管理者(政策制定者)、科教工作者等多个行为体，各行为体对饮食干预的认识和响应受到教育（如饮食与健康的关系认知）、经济（如成本效益认知）和科技（如加工风险物控制）水平的影响，如何有机统一各行为体的认知对开发新的食品系统干预措施无疑具有重要的理论指导意义。本文将以健康为出发点，营养为着力点，食品为落脚点，分析传统营养学理论的局限性，提出超级营养学理论，为食品系统各行为体的认识和决策提供新的理论参考。

2 超级营养的定义

在提出超级营养的定义之前，我们不妨先探讨一个有趣的现象，尽管世界上 40%以上的国家和地区都制定了本国（地区）居民健康膳食指南，但全球人口的营养健康状况仍然是随着经济和科技的发展发生着巨大变化[4-8]。首先，消瘦（营养缺乏）和肥胖（营养过剩）作为营养不良（Malnutrition）的两种典型特征，

其人口比例与经济状况密切相关。在营养缺乏方面，2023 年全球约有 7.33 亿人面临饥饿，每 11 人中就有 1 人食不果腹，而在经济落后的非洲每 5 人中就有 1 人面临饥饿[4]。在营养过剩方面，已经明确的是，经济增长会导致超重/肥胖的增加[5-8]。在早期的一项研究中[7]，收入增加 1%会导致超重或肥胖的患病率增加约 0.2%-0.3%；而在最近的一项调查中[5]，随着经济状况的改善，超重或肥胖发生的几率增加了 14%。其次，随着现代加工技术的发展，方便食品的增加产生的过多精制碳水化合物、油和糖被认为是造成肥胖的真凶[9-11]。伴随肥胖的高血脂被认为是引发动脉硬化性心血管疾病的原因[12]。《Nature》杂志 2020 年的研究发现[13]，尽管上世纪 80 年代以来，高血脂一直被认为是富裕的西方国家人口的典型特征，但心血管疾病风险标志物-非高密度脂蛋白胆固醇（HDL-C）水平最高的国家从 1980 年的西欧高收入国家转变为 2018 年的亚太地区中等收入国家。中国作为 1980 年全球非 HDL-C 水平最低的国家之一，在 2018 年达到或超过了许多高收入的西方国家。从 1990 年到 2017 年，归因于高水平非 HDL-C 的死亡人数西方国家下降了 50%（950000 vs 480000），相反，东亚翻了 3 倍（250000 vs 860000）以上、东南亚翻了两倍以上（110000 vs 310000）[13]。西方人口血脂水平的降低一方面得益于饮食的改善，特别是用不饱和脂肪代替饱和脂肪[14-19]和减少反式脂肪[19-21]，另一方面归因于具有降低血脂功能的他汀类药物的广泛使用[16,22,23]。相反，与高收入西方国家相比，动物源性食品、精制碳水化合物和棕榈油的消费量在东亚和东南亚大幅增加[14,24,25]，而他汀类药物的使用率仍然很低[26,27]。动物源性食品的增加标志着经济发展带来的膳食结构的变化，而精制碳水化合物和棕榈油消费量的增加则意味着食品加工对膳食成分的巨大影响。

由以上分析可见，无论是在经济落后或者发达的国家，人们的膳食结构都很难自然形成理想的宝塔式结构，其主要原因可从三个方面解释。一是受限于经济状况。在经济落后的情况下，花钱少且能吃饱成为吃得值的关键点，因而形成了以植物性碳水化合物为主、动物性油脂和蛋白质摄入不足的膳食结构。例如，中国居民 1982 年碳水化合物的供能比高达 66.2%，脂肪供能比为 22%；经过改革开放后 30 多年经济的快速发展，2012 年中国居民碳水化合物供能比下降至 55.0%，脂肪供能比则上升至 32.9%[28]。二是缺乏科学的营养健康理念。在经济发达的情况下，“好吃”成为吃得好的关键点，因而形成了植物性碳水化合物摄入大量减少、动物性油脂摄入严重超标的膳食结构[14,24,25]。在非洲，超重/肥胖被认为是繁荣和财富的一种象征[29]。在南非，肥胖率从 2008 年的 23.5%显著上升到 2012 年的 27.2%[30]。自 2012 年以来，南非已成为撒哈拉以南非洲肥胖率最高的国家[31]。社会文化、环境和行为因素，包括社会经济地位，可能解释了南非肥胖的高发率[31,32]。三是缺乏科学的加工。首先，从食品厂的加工来看，由过多精制碳水化合物、油和糖组成的方便食品，虽然满足了消费者好吃、便捷或价廉等要求，但营养结构单一，增加了饮食不均衡或不安全因素带来的疾病风险负担[9-11, 14-21]。其次，从家庭烹饪加工来看，膳食宝塔的多数食物是以食材原料列出，即使基于相同的推荐食材，由不同家庭烹饪加工出来的菜肴也是成分和口味各异，加上人们在餐桌上的偏食和挑食，最后会让每个家庭成员实际摄入的营养结构与膳食指南的推荐相去甚远。因为营养结构的不合理，世界人口的肥胖率已由 2012 年的 12.1%上升至 2022 年 15.8%[33]。目前全世界 5 岁及以上的人口中已有超过 10 亿人患有肥胖症，到 2030 年全世界将有超过 11.2 亿成人面临肥胖问题[34]。

综合上述，个人的营养健康状况本质上取决于摄入食品的质和量，而经济（如购买力）、认知（如营养健康理念）和加工（如菜肴烹饪）是影响摄入食品质和量的主要现实因素。因此，从理论上讲，对食品的提质控量是保健康的关键，从实际而言，发展经济和科学加工是促进健康饮食的主要抓手。这要求我们科学准确地定义什么是高质量、最佳水平和健康食品。遗憾地是，传统营养学主要研究食物成分与营养健康的关系，但少有涉及加工和经济等因素与营养健康的关系探讨，突显了运用传统营养理论指导现代营养健康实践的局限性。超级营养学就是要超出传统营养学的认知范围，超越传统营养学的理论局限，系统研究阐释食物营养与加工、经济及健康之间关系的一门科学。超级营养学的主要任务是解答五个“什么”（即应该吃什么、可以吃什么、值得吃什么、喜欢吃什么和愿意吃什么）和解决一个“问题”（即营养健康问题）。

3　超级营养的五大特性

抽象地说，超级营养（Super nutrition）是以科学性为内涵，普适性、前瞻性、愉悦性和合理性为外延的营养理论（图 1）。

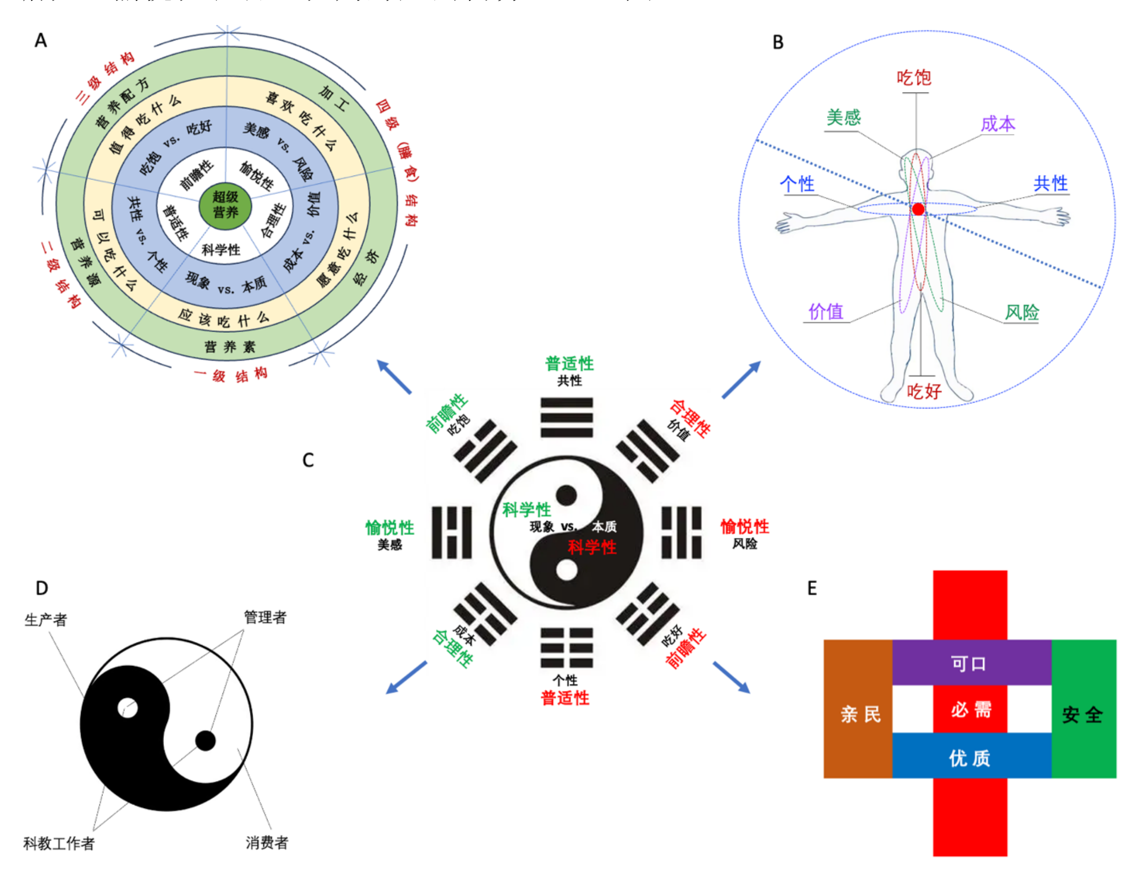


图 1 超级营养理论示意图。（A） 超级营养的内涵解析，（B）营养源的显性特征（共性、成本、吃饱、美感）和隐性特征（个性、价值、吃好、风险）之间相互关系的形象示意，（C）运用“阴阳”学说对超级营养五大特征（科学性、普适性、前瞻性、愉悦性、合理性）内在联系的解析，（D）食品系统中相互关联的行为体（消费者、生产者、管理者、科教工作者）之间关系的形象示意，（E）在超级营养理论指导下生产的智慧食品的五个特征（安全、优质、亲民、必需、可口）及其关系的形象示意。

3.1 科学性

科学性（Scientificalness），即旨在揭示饮食现象的营养本质。营养素是人类社会发展至今体现饮食科学性最核心的关键词。食物是营养素的载体，营养状况是营养素是否充分和均衡的表现，疾病是营养状况长期欠佳的必然结果。饮食与健康的关系主要以营养素为主线进行分析和总结。随着科学技术的发展，人体所需的营养素就好像遗传物质 DNA 表达的蛋白质分子一样，不断被发现和解析，推动营养科学不断地发展。目前已经证实的人体必需营养素可分为 6 个大类，除了水之外，蛋白质和脂类等每个大类又细分为氨基酸和脂肪酸等若干种纯营养素。自 19 世纪以来，已有 19 位科学家因其对维生素的研究而获得诺贝尔奖，这进一步体现了营养素在营养科学发展中的核心价值。所以，营养素是饮食科学性的核心，是解决营养健康问题的基石。超级营养科学性的目标是解决“应该吃什么”的问题，其根本要求是着力营养素及其功能的挖掘，解析营养素对健康的调控原理。

3.2 普适性

普适性（Universality），即能提供人体必需的营养物质。在明确“应该吃什么”的基础上，弄清什么可以提供人体需要的营养素是解决营养健康问题的主要途径。我们把提供营养素的食物统称为营养源。各种农产品就是我们熟知的营养源。但是，每种营养源在营养素的供给上都有其共性和个性。共性体现在很多食物都含有人体所需的多种营养素，个性体现在不同营养源在营养素和其他物质（非营养素）含量等方面有较大差异，特别是某类营养素含量高，而其它营养素含量少的情况非常普遍。例如，大米主要提供人体需要的淀粉等碳水化合物，但仅含有少量的必需氨基酸。相反，肉类主要提供人体需要的蛋白质、氨基酸和脂肪酸，但无法满足碳水化合物的供给。除了营养素的含量不同外，营养素的可消化性也是其个性所在。一般植物类食物含有木质素等细胞壁成分，其可消化性低于动物蛋白。老少皆宜是对营养源共性的肯定，老年人或小孩不宜多吃是对营养源个性的认知。当若干种营养源组合到一起，满足了人体宏营养和微营养的全面需要，即表明营养源的共性和个性取得了最佳平衡。饮食的多样化是目前解决营养源共性与个性平衡的主要措施，“针对特定人群的健康需求，优化推进安全营养农产品组合的膳食方案” 被列为了全国农业科技创新重点领域（2024－2028年）的重点方向之一。营养强化食品是解决营养源共性与个性平衡的重要手段。精准营养，又称个性化营养，是针对特定个体提出的精细化营养健康手段。个性化营养反映营养的个性，人群营养反映营养的共性。从发展规律来看，人群营养是个性化营养的基础，个性化营养是人群营养的补充。无论是个性化营养还是人群营养，其本质都是营养源共性与个性的平衡。所以，超级营养普适性的目标是解决“可以吃什么”的问题，其根本要求是着力营养源的开发，以营养素比例适宜为要领，将“应该吃的”变成“可以吃的”，以促进营养源共性与个性的平衡。

3.3 前瞻性

前瞻性（Perspectiveness），即符合长期健康的营养需要。发达国家或经济富裕国家超重/肥胖人口的比例更高[5,35]，充分说明吃饱和好吃并不代表吃好。只有既吃饱又吃好才是吃得值。吃饱是主观的，是食物量变的结果，消费者短期可感，属于个体特征；吃好是客观的，是食物质变的结果，需要长期的科学的评

价，属于群体特征。吃的都是“可以吃的”为什么还是生病了？吃“可以吃的”目的是摄入“应该吃的”。对于“应该吃的”，摄入的量是否合适是关键问题，这就决定了我们有必要根据人体需要制定科学的营养配方。我们把每天摄入的食物的构成情况称为膳食结构。膳食结构的差异表面上是营养源的不同，本质上是营养素种类和含量的差异。由少数几种食物组成的单调营养结构往往难以平衡营养源的共性和个性，从而会增加饮食风险和疾病负担[1]。最近发表在《Cell》上的一篇综述报告[36]进一步支持了这一观点，该报告提出了一种“长寿饮食”策略，要求营养源主要为非精制的植物性食物，且碳水化合物、蛋白质和脂肪的能量与膳食总能量的比例分别为45%-60%、10%-15%和25%-35%，强化了非精制和植物性食物来源的重要性。《Lancet》2019年的一项研究表明[1]，引起人类死亡的主要饮食风险因素是高钠、低全谷物、低水果、低坚果和籽实、低蔬菜和低 ω-3 脂肪酸的饮食，每种饮食导致的死亡人数均占总死亡人数的 2%以上。然而，鱼油作为 ω-3 脂肪酸的膳食补充剂预防心血管疾病的功效长期以来一直存在争议。综合多项研究[37-46]得到的一个有趣悖论是“缺乏有害、补充无益”[47]。这个悖论一方面反映了营养与健康关系的复杂性[47]，但在另一方面也突显了营养前瞻性的重要性，即某些营养素的缺乏在短期内并不能看出对健康的明显影响，但这些营养素从年幼开始便不能缺，否则积重难返。支持这一观点的是，食用海鱼的习惯使日本“低 ω-3”在全球15个饮食风险因素中排名第14位[1]。相反，中国海洋鱼类的消费量要低得多，尤其是在内陆地区，这使得中国“低 ω-3”在15个饮食风险因素中排名第5位。值得注意的是，除了“低 ω-3”的排名不同外，中国和日本的前八个饮食风险因素排名顺序几乎相同。考虑到海洋鱼类消费与心血管疾病之间存在很强的负相关关系[37,39-41]，ω-3 脂肪酸摄入量的差异可能在很大程度上解释了为什么在世界20个人口最多的国家中，中国（0.299%）和日本（0.069%）的饮食相关心血管疾病死亡率分别位列最高和最低[1]。除了通常会忽视特定营养素（如 ω-3 脂肪酸）的缺乏外，在早期也不容易认真对待营养摄入过量对健康的影响，因为一般情况下，只有当肥胖者在数年的时间保持肥胖时，高血压和糖尿病等肥胖并发症才会开始出现[48]。所以，超级营养前瞻性的目标是解决“值得吃什么”的问题，其根本要求是着力营养结构的调控，以营养配方为抓手、营养素摄入量适宜为要领，将“可以吃的”变成“值得吃的”，以掌握吃饱（量变）与吃好（质变）的平衡。

3.4 愉悦性

愉悦性（Enjoyability），即符合人们的美感（喜欢）需求。从本质上讲，食物选择决定了构建和维持我们身体的营养素和其他物质，而喜欢被确定为对食物选择影响最大的因素[49]。“色香味俱全”始终是人们对食物美感的追求。自从人类发明取火的方法以后，吃肉类熟食不仅促进了人类大脑和智力的发育，也使人类体会到了熟食带来的美味提升的乐趣。由生转熟是食物加工的重大突破，体现了加工对提升风味、口感和营养价值的独特魅力。尽管已有研究表明红肉和加工肉的过量食用有害健康[1,13,36]，许多食品消费者在个人、社会和文化上都依恋他们的肉食习惯，这些饮食习惯在超市、菜单或社交聚会上不断延续[50]。但是，加工带来的风险同样不容小觑。例如，在炭火烧烤的过程中，脂肪变性生成的多环芳烃类化合物具有致癌的风险[51-53]。为了美丽的外观或稳定的口感风味，蛋糕、薯片、爆米花和其他油炸食品的加工通常伴随着使用富含反式脂肪的氢化植物油[54]。反式脂肪引发心血管疾病的风险已得到大量研究的证实[54-57]。生产商使用非

天然的添加剂改善食品色泽或风味的潜在风险已成为消费者普遍关注和顾虑的问题[58]。还有过度加工带来的营养素的损失，例如，当谷物（包括黑麦、小麦、大麦、玉米和高粱）被碾磨成或多或少的精制部分时，在碾磨过程中维生素损失了 70%-80%[59]；在过度加热过程中，美拉德反应会导致赖氨酸和亮氨酸等必需氨基酸严重损失[60,61]。“开发农产品品质数字化表征技术、多维全组分适度加工技术”已被列为全国农业科技创新重点领域（2024－2028 年）的重点方向之一。可见，加工过程中有害物质的产生或有益物质的损失都将增加食品的健康风险，相反，有害物质的减少[58]或有益物质的增加[62]都将提升食品的健康品质。所以，超级营养愉悦性的目标是解决“喜欢吃什么”的问题，其根本要求是着力加工手段，以适宜加工为要领，将“值得吃的”变成“喜欢吃的”，以化解美感与风险的矛盾。

3.5 合理性

合理性（Reasonability），即能适应不同人群对公平合理消费的需求。认可其价值并能承担其价格成本是广大消费者对美食的客观需求。在现实生活中，部分食物（营养源）因为产地分布或成本高昂的原因而得不到普及，导致一些必需营养素的缺乏。例如，海洋食品因为冷链物流条件要求高、跨域运输成本高且损耗大，导致内陆地区新鲜海洋食品消费量很低。尽管精制鱼油能补充 EPA 和 DHA 等 ω-3 脂肪酸，但因其价格较昂贵以及食用的负担很难被大范围推广。一是口服鱼油不带来任何乐趣，而且还要耗费额外的精力。二是长期食用包装鱼油的“微胶囊”是否有损健康仍不清楚[47]。中国政府对农产品实施免税和补贴等优惠政策，不仅保障了猪肉、蔬菜等大宗农产品的供应，也为科研工作者通过科技创新丰富廉价的营养健康食品来源创造了条件。例如，ω-3 脂肪酸强化猪肉的开发生产，为解决内陆地区 ω-3 脂肪酸来源缺乏的问题提供了新的途径[63]，有利于消费者在保持原有饮食习惯且经济实惠的条件下摄入必需营养物质。除了经济状况对消费意愿的驱动外，实践表明，尽管“长寿饮食”策略中推荐了健康饮食需要以植物性蛋白质和脂肪为主[36]，但饮食不会自动转变为动物性蛋白质摄入较低而植物性蛋白质摄入较高的结构[50,64]。以上分析表明，提高食品的价值（特别是健康价值）永远在路上。因此，超级营养合理性的目标是解决“愿意吃什么”的问题，其根本要求是着力成本控制和价值提升，以权衡成本与价值对等为要领，将“喜欢吃的”变成“愿意吃的”，以指导物美价实食品的开发。

综合超级营养的五大特性及其对应解决的营养健康问题，我们易知，营养素是发挥营养作用的直接物质，营养源是提供营养素的载体，营养配方决定营养素的理想摄入情况，膳食（加工食品）决定营养素的实际摄入情况。因此，人类所需的各种营养素及其各自水平可以定义为营养的一级结构，营养源中含有的和营养配方中存在的所有营养素及其相应水平和其他物质可以分别定义为二级和三级结构，膳食（加工食品）中存在的所有营养物质及其可用水平和其他物质可以定义为四级结构（图 2）。营养的一至四级结构分别涵盖了我们“应该吃什么”、“可以吃什么”、“值得吃什么”以及“喜欢和愿意吃什么”（图 1A）的问题。一方面，此定义可以科学地反映从营养素到膳食以及从膳食到营养素的物理、化学或生物转化关系（图 2）。简而言之，基于传统农产品或通过现代生物育种或合成生物学开发营养源是使营养从一级结构向二级结构转变的关键；营养配方，即可用营养源共性和个性的平衡，是使二级结构向三级结构转变的关键；根据食物选择动机因素（如喜好、成本、价值）进行加工是使三级结构向四级结构转变

的关键；摄入、消化、吸收和代谢是使四级结构向一级结构转变的关键。在这种范式下，便于确定哪些“其他物质（已知的非营养素）”被纳入营养源、营养配方或膳食中，便于识别、发掘和利用有益物质（功能性成分），适时控制有害物质。另一方面，采用这一定义将使从营养源到人体的营养传递链完全数字化，这为食品营养与健康数据体系的构建创立了新的研究范式，为引入现代 AI 技术实现精准营养和智能健康管理提供了实施路径。

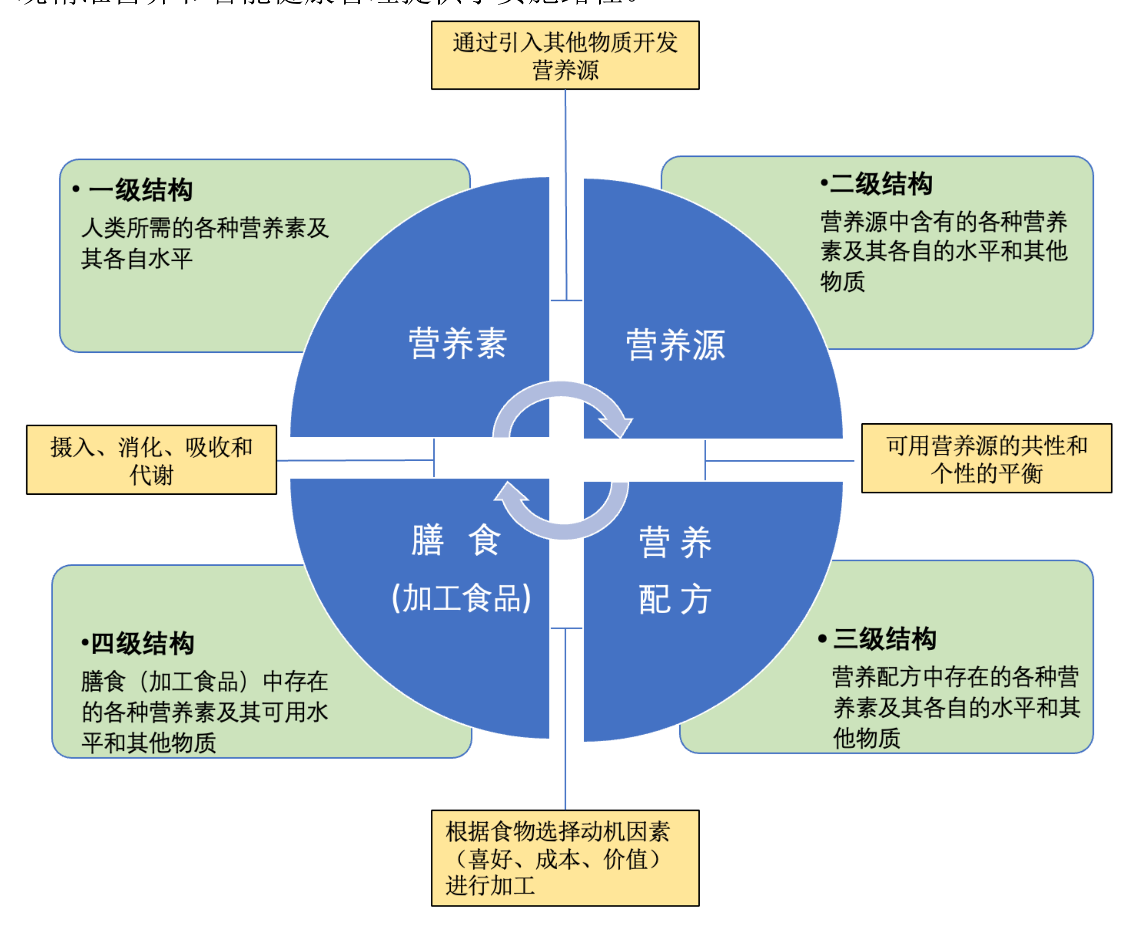


图 2 营养结构的一至四级结构之间的物理、化学或生物转化关系

4 超级营养理论的原创性和重要性

4.1 *超级营养理论的矛盾观*

超级营养理论运用矛盾观指明了消费者认识饮食健康问题的重大误区。一是对营养源共性与个性的认识停留在现象层面而没有深入本质。例如，米饭与红肉相比，两者都能填饱肚子是普通消费者对它们共性的认识，后者比前者更好吃或更抗饿是普通消费者对两者个性的认识，但并不清楚填饱肚子的本质是碳水化合物（米饭的主要营养素）、蛋白质和脂肪（红肉的主要营养素）都能通过分解代谢提供能量，好吃的本质是红肉含有氨基酸和脂肪酸等风味物质，抗饿的本质是蛋白质和脂肪的能量比碳水化合物更高。二是“花钱少且能吃饱”成为衡量成本与价值是否对等的关键，“好吃”成为衡量是否“吃好”的关键，忽略了低成本隐含的必需营养素缺乏、“好吃”隐含的安全方面的风险问题。正是在这些片面观点的影响下，促进了过多的精制碳水化合物、油和糖的消费，而这些食物被认

为是现代社会造成肥胖的真凶[9-11]。因此，超级营养理论通过“科学性”指出了饮食的本质是摄入营养素，并通过“普适性”“前瞻性”“愉悦性”和“合理性”指出了实现科学饮食需要把握的四个要点，即在营养源方面把握好“共性”与“个性”的平衡，在膳食结构方面把握好“吃饱”与“吃好”的平衡，在加工方面把握好“美感”与“风险”的平衡，在经济方面把握好“成本”与“价值”的平衡。

4.2 超级营养理论的联系观

超级营养理论运用联系观剖析了营养素与人体以及消费者与生产者的相互作用对饮食健康状况的调控（图 1B）。鉴于营养素是营养科学性的核心，心脏是人类生命体的核心，我们可以形象地用心脏表示营养的科学性；鉴于吃什么是通过手来选择，手也是体现事物共性和个性的典型代表，我们可以用左右手构成的平衡表示营养的普适性；鉴于吃得饱不饱（饱腹感）、好不好吃（愉悦感）、划不划算（成本分析）是通过脑来感知和分析，其中，饱腹感由下丘脑（位于脑的中央区域）的神经中枢控制[64]，情感（如喜欢）主要由右脑感性意识区控制[65]，逻辑（如成本分析）主要由左脑理性意识区控制[66]，我们可以形象地以心脏位置（象征科学性）为中心，用人脑左、中、右不同区域在推理或感知营养素过程中形成的“成本”“吃饱”“美感”等本能意识与“价值”“吃好”“风险”等对立意识组成的平衡分别表示营养的合理性、前瞻性和愉悦性（图 1B）。一方面，此图可以形象地说明超级营养的五大特性以科学性为内涵，普适性、前瞻性、愉悦性和合理性为外延的内在联系。另一方面，为了更直观地说明这些要素的相互联系，我们不妨把人体心脏示意为“赤道”的中心位置，就会发现位于“赤道”以北的“共性”“成本”“吃饱”和“美感”特征容易被消费者在短期内直观感受，代表营养源的显性特征；把握显性特征的主动权在消费者，如好不好吃是消费者说了算，生产者需要被动迎合消费者的需求。相反，“赤道”以南的“个性”“价值”“吃好”和“风险”特征不易被消费者在短期内直观感受，如吃得好不好需要日久见分晓，这些特征代表营养源的隐性特征；掌控隐性特征的主动权在生产者，因为消费者健康所需，生产者需要主动改善这些特征。生产者只有了解消费者的需求才能生产出消费者满意的食品，消费者的实际消费情况反过来作用于生产者，影响食品的再生产。所以，生产者和消费者是对立统一的一个整体。

4.3 超级营养理论的系统观

超级营养理论运用系统观有机融入了食品系统各行为体对人类饮食健康的贡献及作用途径。如果把营养源的显性特征看成是影响消费者营养状况的“阳面”因子，其隐性特征便是影响消费者营养状况的“阴面”因子。在此基础上，营养问题可进一步抽象为“阴阳”问题，太极图中间的“白”“黑”两仪则分别象征科学性的“现象”和“本质”（图 1C）。食品系统各行为体对营养科学性的把握可作如下类比理解：若白色的“阳面”代表消费者，则黑色的“阴面”代表生产者（图 1D）。食品生产者与消费者的对立统一关系决定了需要有人既要站在消费者角度、又要站在生产者角度来发现和解决人类面临的饮食健康问题。这人是谁？这人就是制定政策的管理者和科教工作者。“阳面”保留一点黑，“阴面”保留一点白，不仅体现了生产者和消费者你中有我、我中有你的相互关系，这黑白两点还可代表管理者和科教工作者在食品系统中所扮演的特殊角色（图 1D）。所以，把营养问题抽象为“阴阳”问题，进一步突显了生产者、消费者、管理者和科教工作者在把握营养科学性的过程中相互作用对消费群体营养健康状况的

重大影响和深远意义。因此，超级营养学把“阴阳”学说运用到营养健康新理论的科学解释，深入浅出地描绘了生产者、消费者、管理者和科教工作者保障营养健康的角色定位，确立了食品系统各行为体对营养健康的作用途径，超越了传统营养学的理论局限。综合来看，消费者通过认知和选择来把握食品的质和量，生产者通过认知和加工来保障食品的质和量，管理者通过法制和政策来管控食品的质和量，科教工作者通过科研来提升食品的质和量。认知靠教育，选择靠经济实力和对价值的认同，加工靠科技，科研和管理靠人才。所以，超级营养理论的提出为食品行业教育、科技、人才“三位一体”的统一和“政产学研用”的有机融合奠定了理论基础。超级营养理论的普及有利于提升食品系统各行为体对饮食健康问题认知的高度、广度和深度，增强各行为体的营养健康意识和社会责任感，形成人人讲科学、懂科学和用科学的社会风气，促进各行为体以更加开阔的思维和视野、以更加积极的协作解决人类共同面临的饮食健康问题。

4.4 超级营养理论的实践观

超级营养理论运用实践观指出了科学实现饮食健康的途径。超级营养理论是开发营养健康食品的理论先导。鉴于产品健康和安全性[68-71]、营养价值[69、70、72]、味道[69、71-73]和风险感知[70]被认为是食品选择的最突出驱动力[50]，令人中意的食品是消费者和生产者和谐共生的纽带。在超级营养理论的指导下生产的食品，理论上具备五个特征，即安全、优质、亲民、必需、可口。安全（Safety），即含有已知风险因子的水平符合公认标准（如风险物质和特定营养素含量的达标）。优质（Merit），即具有优良的内在品质（如健康品质）和外在品质（如感官品质）。亲民（Affordability），即价格公平合理，能满足不同人群的消费需求。必需（Requirement），即含有适宜比例的必需营养物质。可口（Tasty），即通过触觉和味觉感知的理化特性佳。安全、亲民、必需和内在品质是定量描述的理性指标，可口和外在品质是定性描述的感性指标，体现了理性与感性、定性与定量的结合。取安全、优质、亲民、必需、可口五大特性的英文首字母，可将超级营养理论指导下生产的食品命名为Smart(智慧)食品。智慧食品的五大特征，把超级营养理论“应该吃（必需）、可以吃（安全）、值得吃（优质）、喜欢吃（可口）、愿意吃（亲民）”的五个目标进行了有机转化和应用，实现了理论和实践的有机结合（图1E）。

总之，超级营养理论按照营养素→营养源→营养配方→膳食的认知逻辑，首次提出并定义了基于数字化表征的营养一至四级结构，并首次将加工和经济两大宏观要素有机融入到营养理论的科学表述中，确立了加工和经济要素对营养健康的贡献。超级营养理论的提出为构建食品营养与健康数据体系创立了一种新的研究范式，并为引入现代AI技术实现精准营养和智能健康管理提供了实施路径。在超级营养理论的指导下，生产智慧食品的目标是让消费者在安全、优质、价实和美味的条件下足量摄入人体必需的各种营养物质。所以，只有在超级营养理论的指导下才有望生产出智慧食品，有了智慧食品才有望实现自然健康。因此，超级营养是开启智慧食品和自然健康的金钥匙。

参考文献：

[1] GBD 2017 Diet Collaborators. Health effects of dietary risks in 195 countries, 1990-2017: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2017. *Lancet* **393**,1958-1972 (2019).

[2] GBD 2013 Risk Factors Collaborators, Forouzanfar MH, Alexander L, et al. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks in 188 countries, 1990–2013: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2013. *Lancet* **386,** 2287–323 (2015).

[3] GBD 2015 Risk Factors Collaborators. Global, regional, and national comparative risk assessment of 79 behavioural, environmental and occupational, and metabolic risks or clusters of risks, 1990–2015: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2015. *Lancet* **388,** 1659–724 (2016).

[4] FAO, IFAD, UNICEF, WFP and WHO. The State of Food Security and Nutrition in the World 2023. Urbanization, agrifood systems transformation and healthy diets across the rural–urban continuum. Rome, FAO. https://doi.org/10.4060/cc3017en 2023.

[5] Islam, A. N. M. S. et al. The global burden of overweight-obesity and its association with economic status, benefiting from STEPs survey of WHO member states: A meta-analysis. *Prev. Med. Rep.* **46**,102882 (2024).

[6] Bu, T. et al. Relationship between national economic development and body mass index in chinese children and adolescents Aged 5–19 from 1986 to 2019. *Front. Pediatr.* **337** (2021).

[7] Ferretti, F. & Marian, M. Simple vs. complex carbohydrate dietary patterns and the global overweight and obesity pandemic. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. **14**,1174 (2017)

[8] Seydel, G. S. et al. Economic growth leads to increase of obesity and associated hepatocellular carcinoma in developing countries. *Ann. Hepatol.*, **15**, 662-672 (2016)

[9] Bradley,P. Refined carbohydrates, phenotypic plasticity and the obesity epidemic, *Medical Hypotheses* **131,** 109317 (2019)

[10] Wali, J. A. et al. Determining the metabolic effects of dietary fat, sugars and fat-sugar interaction using nutritional geometry in a dietary challenge study with male mice. *Nat. Commun.* **14**, 4409 (2023)

[11] Arshad, S. et al. Replacement of refined sugar by natural sweeteners: focus on potential health benefits. *Heliyon* **8**, e10711 (2022)

[12] Powell-Wiley, T. M. et al. Obesity and Cardiovascular Disease: A Scientific Statement From the American Heart Association. *Circulation*. 143, e984-e1010 (2021)

[13] NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). Repositioning of the global epicentre of non-optimal cholesterol. *Nature* **582**, 73-77 (2020).

[14] Bentham, J. et al. Multi-dimensional characterisation of global food supply from 1961 to 2013. *Nat. Food* **1**, 70–75 (2020).

[15] Miller, J. C. et al. Trends in serum total cholesterol and dietary fat intakes in New Zealand between 1989 and 2009. *Aust. N. Z. J. Public Health* **40**, 263–269 (2016).

[16] Eriksson, M. et al. Greater decreases in cholesterol levels among individuals with high cardiovascular risk than among the general population: the northern Sweden MONICA study 1994 to 2014. *Eur. Heart J.* **37**, 1985–1992 (2016).

[17] Arnett, D. K. et al. Twenty-year trends in serum cholesterol, hypercholesterolemia, and cholesterol medication use: the Minnesota Heart Survey, 1980–1982 to 2000–2002. *Circulation* **112**, 3884–3891 (2005).

[18] Houterman, S., Verschuren, W. M., Oomen, C. M., Boersma-Cobbaert, C. M. & Kromhout, D. Trends in total and high density lipoprotein cholesterol and their determinants in The Netherlands between 1993 and 1997. *Int. J. Epidemiol.* **30**, 1063–1070 (2001).

[19] Vartiainen, E., Laatikainen, T., Tapanainen, H. & Puska, P. Changes in serum cholesterol and diet in North Karelia and all Finland. *Glob. Heart* **11**, 179–184 (2016).
[20] Micha, R. et al. Global, regional, and national consumption levels of dietary fats and oils in 1990 and 2010: a systematic analysis including 266 country-specific nutrition surveys. *Br. Med. J.* **348**, g2272 (2014).
[21] Leth, T., Jensen, H. G., Mikkelsen, A. A. & Bysted, A. The effect of the regulation on trans fatty acid content in Danish food. *Atheroscler. Suppl.* **7**, 53–56 (2006).
[22] Kypridemos, C. et al. Quantifying the contribution of statins to the decline in population mean cholesterol by socioeconomic group in England 1991 - 2012: a modelling study. *PLoS ONE* **10**, e0123112 (2015).
[23] Ford, E. S. & Capewell, S. Trends in total and low-density lipoprotein cholesterol among U.S. adults: contributions of changes in dietary fat intake and use of cholesterol-lowering medications. *PLoS ONE* **8**, e65228 (2013).
[24] He, Y. et al. The dietary transition and its association with cardiometabolic mortality among Chinese adults, 1982–2012: a cross-sectional population-based study. *Lancet Diabetes Endocrinol.* **7**, 540–548 (2019).
[25] Wolmarans, P. Background paper on global trends in food production, intake and composition. *Ann. Nutr. Metab.* **55**, 244–272 (2009).
[26] Roth, G. A. et al. High total serum cholesterol, medication coverage and therapeutic control: an analysis of national health examination survey data from eight countries. *Bull. World Health Organ.* **89**, 92–101 (2011).
[27] Zhang, M. et al. Prevalence of dyslipidemia and achievement of low-density lipoprotein cholesterol targets in Chinese adults: a nationally representative survey of 163,641 adults. *Int. J. Cardiol.* **260**, 196–203 (2018).
[28] 杨慧霞 & 王俊平. 1982-2012年中国居民膳食摄入变化. *食品工业* **41**,244-248 (2020).
[29] Neema, S.et al. “Fat People Are More Respected”: Socio-Cultural Construction of Obesity and Overweight Risk & Prevention in Ugandan Communities. In: Falade, B., Murire, M. (eds) Health Communication and Disease in Africa. Palgrave Macmillan, Singapore. 2021.
[30] Sartorius, B. et al. Determinants of Obesity and Associated Population Attributability, South Africa: Empirical Evidence from a National Panel Survey, 2008-2012. *Plos One* **10**, e0130218 (2015).
[31] Micklesfield, L.K. et al. Socio-cultural, environmental and behavioural determinants of obesity in black South African women. *Cardiovasc. J. Afr.* **24**, 1–7 (2013).
[32] Alaba, O.A. & Chola, L. Prevalence of age-adjusted obesity in South Africa and the influence of social determinants: an ecological analysis. *Lancet* **381**, S6 (2013).
[33] NCD Risk Factor Collaboration (NCD-RisC). Worldwide trends in underweight and obesity from 1990 to 2022: a pooled analysis of 3663 population- representative studies with 222 million children, adolescents, and adults. *Lancet* **403**, 1027–50 (2024).
[34] Kelly, T. et al. Global burden of obesity in 2005 and projections to 2030. *Int. J. Obes.* **32**, 1431–1437 (2008)
[35] Yu, C.C. et al. The epidemiology of obesity. *Metabolism* **92**, 6–10 (2019).
[36] Longo, V.D. & Anderson, R.M. Nutrition, longevity and disease: From molecular mechanisms to interventions. *Cell* **185**, 1455-1470 (2022).

[37] Kromhout, D. et al. The inverse relation between fish consumption and 20-year mortality from coronary heart disease. *N. Engl. J. Med.* **312**, 1205-1209 (1985).
[38] Ascherio, A., et al., Dietary intake of marine n-3 fatty acids, fish intake, and the risk of coronary disease among men. *N. Engl. J. Med.* **332**, 977-982 (1995).
[39] Hu, F.B., et al., Fish and omega-3 fatty acid intake and risk of coronary heart disease in women. *JAMA* **287**, 1815-1821 (2002).
[40] He, K., et al., Accumulated evidence on fish consumption and coronary heart disease mortality: a meta-analysis of cohort studies. *Circulation* **109**, 2705-2711 (2004).
[41] Del Gobbo, L.C., et al., ω-3 Polyunsaturated Fatty Acid Biomarkers and Coronary Heart Disease: Pooling Project of 19 Cohort Studies. *JAMA Intern. Med.* **176**, 1155-66 (2016).
[42] Roncaglioni, M.C., et al., n-3 fatty acids in patients with multiple cardiovascular risk factors. *N. Engl. J. Med.* **368**, 1800-1808 (2013).
[43] Bowman, L., et al., Effects of n-3 Fatty Acid Supplements in Diabetes Mellitus. *N. Engl. J. Med.* **379**, 1540-1550 (2018).
[44] Manson, J.E., et al., Marine n-3 Fatty Acids and Prevention of Cardiovascular Disease and Cancer. *N. Engl. J. Med.* **380**, 23-32 (2019).
[45] Nicholls, S.J., et al., Effect of High-Dose Omega-3 Fatty Acids vs Corn Oil on Major Adverse Cardiovascular Events in Patients at High Cardiovascular Risk: The STRENGTH Randomized Clinical Trial. *JAMA* **324**, 2268-2280 (2020).
[46] Bhatt, D.L., et al., Cardiovascular Risk Reduction with Icosapent Ethyl for Hypertriglyceridemia. *N. Engl. J. Med.* **380**,11-22 (2019).
[47] 张东山. 鱼油预防冠心病？一个超级营养素如何在证明自己的道路上屡败屡战.知识分子，2023. https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzIyNDA2NTI4Mg==&mid=2655531620&idx=1&sn=00e82dacd6c6ac2592917eb85218ddae&chksm=f3a83009c4dfb91f4628b45c4fd0ea0e7b61a7fd3b6470a4394dd6f34733a15511477a04a8b3&scene=27
[48] Segula, D. Complications of obesity in adults: A short review of the literature. *Malawi. Med. J.* **26**, 20–24 (2014)
[49] Ehrmantraut, L.E. et al. Self-selected diets: Exploring the factors driving food choices and satisfaction with dietary variety among independent adults. *Food Qual. Prefer.* **117**, 105154 (2024).
[50] Onwezen, M.C. & Dagevos, H. A *meta*-review of consumer behaviour studies on meat reduction and alternative protein acceptance. *Food Qual. Prefer.* **114**, 105067 (2024).
[51] Dyremark, A. et al. Polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) emissions from charcoal grilling. *Atmos. Environ.* **29**, 1553-1558 (1995).
[52] Wongmaneepratip, W. & Vangnai, K. Effects of oil types and pH on carcinogenic polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in grilled chicken. *Food Control* **79**, 119-125 (2017).
[53] Kim, H.J. et al. Effect of charcoal type on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled meats. *Food Chem.* **343**, 128453 (2021).
[54] Reming, V. et al. Trans fats in America: a review of their use, consumption, health implications, and regulation. *J. Am. Diet. Assoc.* **110**, 585-592 (2010).
[55] Esmaillzadeh, A. & Azadbakht, L. Home use of vegetable oils, markers of systemic inflammation, and endothelial dysfunction among women. *Am. J. Clin. Nutr.* **88**, 913-921 (2008).
[56] Kummerow F.A. The negative effects of hydrogenated trans fats and what to do about them. *Atherosclerosis* **205**, 458-465 (2009).

[57] Allen, B. C. et al.Meta-regression analysis of the effect of *trans* fatty acids on low-density lipoprotein cholesterol. *Food Chem. Toxicol.* **98**, 295-307 (2016).
[58] Mahmud, N. et al. A review of different frying oils and oleogels as alternative frying media for fat-uptake reduction in deep-fat fried foods. *Heliyon* **9**, e21500 (2023).
[59] Hegedüs, M. et al. The influence of milling on the nutritive value of flour from cereal grains. 7. Vitamins and tryptophan. *Plant Foods Hum. Nutr.* **35**, 175-180 (1985).
[60] Tucker, B. W. et al. Loss of available lysine in protein in a model Maillard reaction system [Easily damaged by processing and/or storage of food, amino acids]. Acs Symposium Series-American Chemical Society 1983.
[61] Nutritional Consequences of the Maillard Reaction. Amino Acid Availability from Fructose-leucine and Fructose-tryptophan in the Rat. *J. Nutr.* **103**, 657-663 (1973)
[62] Chen X. & Kitts D. D. Antioxidant and Anti-Inflammatory Activities of Maillard Reaction Products Isolated from Sugar–Amino Acid Model Systems. *J. Agric. Food Chem.* **59**, 11294-11303 (2011).
[63] Sun, Y. et al. Effects of n-3 polyunsaturated fatty acids and selenomethionine supplementation on physicochemical properties, oxidative stability and endogenous enzyme activities of fresh pork loin. *Food Chem. X* 101949 (2024).
[64] Onwezen, M. C. et al. Social norms support the protein transition: The relevance of social norms to explain increased acceptance of alternative protein burgers over 5 years. *Foods* **11**, 3413 (2022).
[65] Anand, B. K. & Brobeck, J. R. Localization of a ‘‘feeding center’’ in the hypothalamus of the rat. *Proc. Soc. Exp. Biol. Med.* **77**, 323–324 (1951).
[66] Lindell, A. K. Continuities in emotion lateralization in human and nonhuman primates. *Front. Hum. Neurosci.* **7**, 464 (2013).
[67] Corballis, M. C. Left Brain, Right Brain: Facts and Fantasies. *PLoS Biol.* **12**, e1001767 (2014).
[68] Bryant, C. & Barnett, J. Consumer acceptance of cultured meat: An updated review (2018–2020). *Appl. Sci.* **10**, 5201 (2020).
[69] Florença, S. G. et al. The motivations for consumption of edible insects: A systematic review. *Foods* **11**, 3643 (2022).
[70] Pakseresht, A. et al. Review of factors affecting consumer acceptance of cultured meat. *Appetite* **170**, 105829 (2022).
[71] Weinrich, R. Opportunities for the adoption of health-based sustainable dietary patterns: A review on consumer research of meat substitutes. *Sustainability* **11**, 4028 (2019).
[72] Mina, G. et al. The Potential Future of Insects in the European Food System: A Systematic Review Based on the Consumer Point of View. *Foods* **12**, 646 (2023).
[73] Valli, C. et al. People’s Values and Preferences about Meat Consumption in View of the Potential Environmental Impacts of Meat: A Mixed-methods Systematic Review. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **20**, 286 (2022).

(通讯作者：方正锋 E-mail:zfang@sicau.edu.cn)